Fisheries and Oceans Canada | Pêches et Océans Canada
Science | Sciences

National Capital Region | Habitat Status Report 2004/002

# Review of Scientific Information on Impacts of Seismic Sound on Fish, Invertebrates, Marine Turtles and Marine Mammals

***Background***

*A Workshop to develop a "Decision Framework for Seismic Survey Referrals" held in March 2003 produced an inventory of ecological factors that DFO should consider when dealing with referrals for seismic surveys in Canadian waters. The workshop also discussed the sources of uncertainty about effects of seismic sounds on those ecological factors, and ways that the uncertainty could be presented in science documents evaluating possible impacts. The workshop did not attempt to review critically the scientific literature on impacts of seismic sounds or effectiveness of mitigation options. Consequently the meeting did not address tolerances for ecological impacts, if any, or operational standards for respecting such tolerances.*

*Following that Workshop, teams of scientists prepared major literature reviews of the primary and secondary literature that reports on experimental studies and field monitoring of effects of sound, particularly seismic sound, on marine organisms. Reviews were also contracted of the standards and mitigation methods applied by other national and international bodies which regulate seismic surveys in marine ecosystems, and of the strengths and problems with various sound propagation models in marine environments. These papers were reviewed at a National Advisory Process meeting on Seismic Impact Evaluation Framework in May 2004, although time did not allow a detailed critical review of the paper on standards and mitigation methods.*

*Figure 1: Map of Canada*

## *Summary*

- From the evidence available, it can be concluded that seismic sounds in the marine environment are neither completely without consequences nor are they certain to result in serious and irreversible harm to the environment. In the huge range of effects between those extremes, however there are many *potential* detrimental consequences. In general risks of these consequences are poorly quantified, often unknown, and likely to be variable with both conditions of the environment and of the organisms exposed to the sounds. The long and widespread history of seismic surveys globally in marine environments with no documented fish or invertebrate kills, and only circumstantial evidence of associations with infrequent strandings of marine mammals and giant squid, suggest that seismic surveys with fairly routine mitigation measures in place are unlikely to pose high risk of mortality of marine organisms. However, this suggestion must be qualified, because sublethal or longer-term effects could have occurred and not have been detected by the monitoring programs typically in place.

- Immediate behavioral reactions to exposure to seismic sound have been widely documented in marine organisms, especially marine mammals; particularly behaviors which would result in avoiding the immediate area where the sounds are being produced, or reducing vocalisations. The possible longer-term consequences of these short-term behavioral changes are debated among experts. The debate is largely speculative and there is little empirical basis to determine the likelihood of the full chain of events which would lead to serious longer-term consequences of the short-term behavioral reactions. However, the risk to be managed would be the combined probability of all the events in the chain occurring.

- Whatever the absolute level of risk posed by seismic sounds, there are mitigation measures available which the evidence available suggests can reduce the risk by varying, but sometimes substantial, amounts. The effectiveness of specific mitigation measures was not reviewed in detail at the meeting, but was generally agreed likely to depend on the effect of concern and how the measures are implemented. The impact on the seismic operations of application of some mitigation methods, such as not conducting surveys in critical times and places, will also vary with many factors, but sometimes also could be large. Clearly much more research and monitoring are needed to better clarify and quantify the unknown risks and uncertain effects, if they occur, and the effectiveness of mitigation measures to a wider range of potential effects. Towards that end, some key research needs are listed below.

## Introduction

Literature reviews of the primary and secondary literature that reports on experimental studies and field monitoring of effects of sound, particularly seismic sound, on marine organisms were evaluated in May 2004, by a group of scientists from DFO, other federal and international agencies, the hydrocarbon exploration industry and environmental groups. The review indicated that information was incomplete to varying degrees in essentially all areas related to impacts of seismic sound on marine ecosystems. Nonetheless, the background papers and scientific deliberations resulted in a body of information that allowed the following conclusions to be reached.

These conclusions provide a science basis for developing a regulatory framework for use of sound in aquatic environments, at least in the frequencies used for seismic surveys. Some of the conclusions based on the laboratory studies reviewed may generalise to higher frequencies as well, but the review focused on scientific studies directly applicable to seismic sound. The conclusions also contribute to the scientific basis for an integrated approach to managing human impacts on marine ecosystems, and for dealing with referrals of applications for seismic surveys at the regional to national level within DFO.

## Habitat Concern

The issue of concern was the effects of sound, particularly seismic sound, on marine organisms. Advice was sought to provide a scientific basis for developing a regulatory framework for use of sound in aquatic environments, at least in the frequencies used for seismic surveys.

## Management Considerations

***Overall Considerations:***

1) The following statements and conclusions are based on information available and presented at the time of the Seismic Impacts Evaluation Framework workshop. Additional research is needed in many areas, and a number of these are identified in the meeting proceedings. These statements and conclusions

should be re-evaluated as new information becomes available.

2) When considering the possible impacts of seismic sounds on the marine ecosystem, it makes sense to embed these considerations within the larger framework of the impact of all anthropogenic noise on the ecosystem. The major anthropogenic sources of noise that might be appropriate to consider in a holistic view would include seismic sounds, shipping, explosives, construction, and low-frequency SONAR. Moreover, the significance of impacts of sound in the environment, if any, should be evaluated in the context of other uses of ecosystem.

3) The dearth of scientific information, especially concerning field experiments on fish, invertebrates, and the larger marine mammals, makes it extremely difficult to evaluate the impact of a particular type of seismic sound, or more generally noise, on a particular species. Restricting our consideration to only seismic sound impacts would have reduced the already-sparse information base to one that would not have supported any conclusions with an acceptable level of confidence, so we have looked more widely for relevant information.

4) If was not just for convenience that we looked for information more widely than just considering publications on effects of seismic sound on marine species. Given the scarcity of hard information on so many facets of this multi-dimensional problem, it is likely that a meaningful appreciation of risk can only be obtained by taking an integrated view of all the sources of information available.

5) Many conclusions refer to the likelihood of various biological effects, if animals were exposed to seismic sound. Likelihood is used in a relative sense, and not as the product of quantitative risk assessments, which are not possible with the information available. Saying that an event has a "high likelihood" does not mean we necessarily expect to see it in nine out of every ten animals exposed to the sound, or even in nine out of ten replicates of the same experiment. Rather, it means that compared to the expectation of the event in the absence of seismic sound, the likelihood of the event has increased substantially, and it would be observed if sought with due diligence. However, it still may not be the typical event. Where quantification of the probability of an event is possible, we use the term "probability" rather than "likelihood".

6) The conclusions that follow often refer to "seismic sound" and "field operating conditions". These terms are used colloquially and are not defined prescriptively. In this document "seismic sound" refers generally to that produced by the types of airguns and arrays normally used at present in Canadian waters. "Field operating conditions" refers to 2-D and 3-D seismic surveys using measures such as ramp-up of sound level at onset, and ceasing sound emissions when cetaceans are known to be in the proximity of the operations.

7) Both the likelihood and severity of biological effects that may result from seismic surveys are likely to vary with local conditions of the environment (ice coverage, bottom topography, sea state, etc.) and conditions of the organisms (breeding state, nutritive condition, etc.). These conditions should not be ignored when evaluating risks and the potential for mitigation, however regulatory frameworks do not need complex rules to be effective.

***Limitations for quantitative conclusions:***

*8)* It was agreed that the biologically meaningful aspect of seismic sound is the "received sound" by the organism(s) potentially being affected. However, "received sound" is multi-dimensional. Seismic sound (or noise in general) can

be characterised by its frequency spectrum (acoustic energy or pressure as a function of acoustic frequencies), peak pressure (a time domain concept, referring to the maximum instantaneous amplitude of the pressure signal), rms pressure (mean pressure averages over a time interval), Sound Exposure Level (a measure of the "dosage" of sound energy received over a time interval), and in other ways.

9) The mechanisms by which exposure to seismic sound could result in biological impacts are sufficiently varied that no one metric may be sufficient to describe the risk of impact from a particular type of seismic sound. Some mechanisms may be well characterised by one or two of these metrics; others may not be well characterised by any of them. For example, peak pressure may be the most relevant parameter for risk of trauma, whereas rms pressure may be the most relevant parameter for non-trauma effects such as Temporary Threshold Shifts [TTS]. The frequency band, intensity, and duration of exposure all contribute to auditory effects, because although the impact must occur within the frequency band of exposure, we anticipate that auditory impact is greater within the hearing range of a species, and will decline towards the margins of its hearing threshold.

10) Many studies of the impacts of seismic sound on marine animals reduce the information about the sound used or received to a few numbers. This practice often discards important information, and makes inter-comparison of results across studies very difficult.

11) Although careful experimentation ought to be able to determine which feature(s) of the sound stimulus caused the observed reactions (when they occurred), the existing literature on experiments with marine fish and invertebrates rarely describes completely enough the characteristics of the sounds used to allow biological observations to be interpreted with confidence.

12) The literature on experiments and field observations of marine mammals exposed to sound stimuli is more extensive than the literature on effects on other types of marine organisms, and therefore likely to provide a more complete (but still partial) basis for setting thresholds. However the results, taken together, were complex and inconsistent and were an insufficient basis for agreement on quantitative thresholds for impacts on marine mammals, even from those studies where there were adequate descriptions of the sound characteristics. The major review by the NMFS Acoustic Criteria Panel is devoting much more time to this information, and may contain a quantitative synthesis of stimulus-response relationships from the information available at present. That review, when released, may comprise a useful source of information for defining regulatory tolerances. Where sensitivities of marine turtles, fish, or invertebrates are documented to be greater than sensitivities of marine mammals those factors should be taken into account in the Canada standards, guidelines and/or regulations. It was conjectured that sedentary species that cannot leave an area may experience higher levels of exposure to seismic sound than mobile animals, and this factor may be taken into account in management as well.

13) Ecological "significance" can be a value-laden term, although in these conclusions "significant" is used only in the context of DFO's areas of responsibility. Specifically, DFO has a responsibility for conservation of aquatic species (except birds) and ecosystems, and where detrimental population-scale impacts are considered likely, DFO must ensure that the impacts are mitigated or remediated. Likewise, for aquatic species protected under Schedule 1 of SARA, if deaths, harm or harassment of individuals is considered likely to occur, DFO must

either act to ensure the impacts are ameliorated, or issue permits under the provisions of Section 73 of SARA.

***Other limitations:***

14) A number of studies reported sub-lethal effects on marine organisms, such as elevated stress-related chemicals, and damage to ears or other morphological structures. The dearth of long-term studies of marine organisms exposed to seismic sounds means that the long-term consequences of these effects, when they occur, are unknown.

15) The severity of impact at the population level may be higher for an effect like auditory masking, if it occurs, because masking has the potential to affect a very large geographical area for low frequency sounds. Masking also may have few immediately observable signs that impacts are occurring, so mitigation may be less likely to be triggered than with individual mortalities due to trauma, (which have limited geographical extent and are more easily observable).

## *Conclusions Regarding Fish*

***Physical Effects***

1) There are no documented cases of fish mortality upon exposure to seismic sound under field operating conditions. With regard to the detectability of fish kills, if they occurred, it was noted that in Canada seismic surveys have frequently, but not always, included follow-on vessels instructed to watch for fish kills, and none have been observed. It was also noted that fish kills are not necessarily cryptic events, and kills caused by anoxic events, toxic spills etc are often readily detected. However, it was also argued that the efficiency of detecting fish kills by the follow-on vessels was not tested independently, so the possibility of undetected fish kills cannot be eliminated.

2) Under experimental conditions one study found that some subjects from three of four species tested suffered lethal effects from low-frequency (<500 Hz) tonal sounds, under exposure levels of 24 h at >170 dB. Participants noted that the experimental regime differed greatly from field operating conditions of seismic surveys, so extrapolation of the results to seismic surveys was not warranted. However some participants argued that the result indicates that risk of direct fish mortality from sounds with some characteristics of seismic sound cannot be discounted completely.

3) One anecdotal report of fish mortality upon exposure to an airgun less than 2 m away was discussed and found to be inconclusive when considered relative to field operating conditions. Overall, exposure to seismic sound is considered *unlikely* to result in direct fish mortality.

4) Under experimental conditions, sub-lethal and/or physiological effects, including effects on hearing, have sometimes been observed in fish exposed to an airgun. The experimental design made it impossible to determine to the satisfaction of all experts what intensity of sound was responsible for the observed damage to ear structures, nor the biological significance of the damage that was observed. Simulated field experiments attempting to study such effects have been inconclusive. Currently, information is inadequate to evaluate the likelihood of sub-lethal or physiological effects under field operating conditions. The ecological significance of sub-lethal or physiological effects, were they occur, could range from trivial to important depending on their nature.

***Behavioral Effects***

5) There is high likelihood of obtaining the following effects in some fish exposed to seismic sound:

   - startle response,

- change in swimming patterns (potentially including change in swimming speed, and directional orientation), and
- change in vertical distribution.

6) These effects are expected to be short-term, with duration of effect less than or equal to the duration of exposure, are expected to vary between species and individuals, and be dependant on properties of received sound. The ecological significance of such effects is expected to be low, except where they influence reproductive activity.

7) Several scientific studies have investigated other behavioral effects on fish during seismic surveys. Some have found the effects listed below and some have not:

   - Change in horizontal distribution of fish not closely associated with habitat structures such as a reefs or pinnacles,
   - Change in catchability of fish possibly related to changes in behavior. Differences in experimental regimes and lack of adequate controls in some of the experiments means that the published results are an insufficient basis to predict the nature of any change that may occur, or even if a change will occur.

8) The duration of these effects may or may not extend beyond the duration of exposure, are expected to vary between species and individuals, and be dependant on the properties of received sound. The ecological significance of such effects is expected to be low, except when they may lead to a dispersion of spawning aggregations or deflection from migration paths. The magnitude of effect in these cases will depend on the biology of the species and the extent of the dispersion or deflection.

***Functional Uses of Sound***

9) The potential for seismic sound to disrupt communication, detection of predators/prey, navigation and other functional uses of sound by fish has not been studied. There is speculation that the discontinuous nature of seismic signals may allow these functions to occur between sound "pulses". There is also speculation that behavioral responses may include cessation of sound production by fish. If it were to occur, hearing damage would also be expected to impact these functions. Ecological significance of such effects is unknown.

## *Conclusions Regarding Invertebrates*

***Physical Effects***

1) There are no documented cases of invertebrate mortality upon exposure to seismic sound under field operating conditions. An anecdotal report of beachings of giant squid on two occasions, which corresponded to periods of seismic activity, was discussed and found to be inconclusive.

2) Under experimental conditions, lethal and/or sub-lethal effects, including effects on external structure, have sometimes been observed in invertebrates exposed close to (less than 5 m) an airgun.

3) Therefore, exposure to seismic sound is considered *unlikely* to result in direct invertebrate mortality.

***Physiological Effects***

4) There is a series of publications showing effects of extended exposure to non-seismic sounds on the physiology of crustacean under experimental conditions. Effects include reduced growth and reproduction rates and behavioral changes, which indicate the

sensitivity of some invertebrates to noise. In a gastropod (mollusc) the physiological effects (sign of stress) were reported under field seismic operating conditions. In other species such effects were rarely present, except for some sign of excitation of ensonified crabs compared to control crabs.

5) Currently, information is lacking to evaluate the likelihood of sub-lethal or physiological effects on crustaceans during pre-molt, molting and post-molt periods.

6) The ecological significance of sub-lethal or physiological effects, were they occur, could range from trivial to important depending on their nature.

***Behavioral Effects***

7) There is high likelihood of obtaining the following effects in some invertebrates exposed to seismic sound:

   - startle response,
   - change in swimming/movement patterns (potentially including change in swimming/movement speed, and directional orientation).

8) Both increases and decreases in catch rates of commercially exploited species have been documented, but changes do not occur consistently.

9) These effects are expected to be short-term, with duration of effect often less than the duration of exposure, are expected to vary between species and individuals, and be dependent on properties of received sound.

10) Some invertebrates are sedentary or have limited locomotive capacity. Therefore their capacity to avoid seismic sound is extremely limited compared to many fish and marine mammals. This may increase their exposure to seismic sounds, but there is no basis on which to assume that increased exposure makes such species inherently more or less sensitive to those sounds.

11) The ecological significance of the effects is expected to be low, except if effects of exposure to seismic sounds were to influence reproductive or growth (molting) activities, or lead to a dispersion of spawning aggregations or deflection from migration paths. The magnitude of effect in these cases will depend on the biology of the species and the extent of the dispersion or deflection.

***Functional Uses of Sound***

12) The potential for seismic sound to disrupt communication, orientation, detection of predators/prey, locomotion and other functional uses of sound by invertebrates has not been studied. Loud sounds will reduce the efficiency of communication and other functional uses of sounds, but the severity and conditions under which this occurs with invertebrates are unknown. It is not known if invertebrates can communicate acoustically during the inter-pulse intervals that occur between seismic transmissions. Ecological significance of such effects, if they occur, is unknown.

## *Conclusions about Zooplankton, Eggs and Larvae of Fish and Invertebrates*

1) Few studies of the effects of seismic sound on eggs and larvae or on zooplankton were found. A number of these provided inadequate description of experiment design, properties of the sound applied as treatments, or had methodological shortcomings.

2) Data are generally insufficient to evaluate the potential damage to eggs and larvae of fish and shellfish (or other planktonic organisms) that might be caused by seismic sound under field operating conditions.

3) From the experiments reported to date, results do show that exposure to sound may arrest development of eggs, and cause developmental anomalies in a small proportion of exposed eggs and/or larvae; however these results occurred at numbers of exposures much higher than are likely to occur during field operation conditions, and at sound intensities that only occur within a few meters of the sound source.

4) Effects of seismic sounds on behavioral functions and sensory perception of fish and invertebrate eggs and larvae are unknown;

5) In general, the magnitude of mortality of eggs or larvae that models predict could result from exposure to seismic sound would be far below that which would be expected to affect populations. However, special life history characteristics such as extreme patchiness in distribution and timing of key life history events in relation to the duration and coverage of seismic surveys may require case by case assessment.

6) No studies were found which specifically investigated the role of seismic sounds in recruitment variation of marine fish or invertebrates. There have been a large number of research studies on causes of variation in recruitment of marine fish or invertebrates, and none has considered that there are recruitment anomalies (positive or negative) which might be linked in space or time to seismic survey operations. This negative evidence applies at the scale of stocks, but does not provide information about the potential for effects on local-scale recruitment dynamics.

## *Conclusions Regarding Marine Turtles*

1) Auditory studies suggest that sea turtles, specifically loggerhead and green turtles, are able to hear and respond to low frequency sound, but their hearing threshold appears to be high.

2) In three studies, the following behavioral responses of sea turtles in enclosures exposed to airgun sounds were sometimes observed:

   - increased swimming speed,
   - increased activity,
   - change in swimming direction, and
   - avoidance.

3) Sea turtles may become accustomed to seismic sound over time, but results of three studies were inconclusive on this matter.

4) Loss of hearing sensitivity and physiological stress response has also been considered as a possible consequence of exposure of sea turtles to seismic sound, but the one study reviewed was inconclusive.

5) The response, if any, of free-ranging sea turtles to seismic sound conducted under field operating conditions is unknown.

6) Based on studies that have been conducted to date, it is considered *unlikely* that sea turtles are more sensitive to seismic operations than cetaceans or some fish. Therefore, mitigation measures designed to reduce risk or severity of exposure of cetaceans to seismic sounds may be informative about measures to reduce risk or severity of exposure of sea turtles to seismic sounds. However sea turtles are harder to detect both visually and acoustically than are many species of cetaceans, so mitigation strategies based on sightings or acoustic detection of turtles, are expected to be less effective for turtles than for cetaceans.

## *Conclusions Regarding Marine Mammals*

### *Mortality and Physical Effects*

1. There are no documented cases of marine mammal mortality upon exposure to oil and gas exploration seismic surveys. There is one case of a stranding event involving two whales coincident in space and time with a research vessel conducting seismic operations. There is one stranding event involving the same vessel and whales, coincident in time but not space, with no obvious mechanism that could bridge the distance between the vessel and the stranding site. In both cases the research vessel was also operating mid-frequency airgun systems that produce sound significantly more similar in character to the tactical mid-frequency sonar implicated in whale mass stranding events, than is seismic sound. The role of the different sound sources in the stranding events could not be resolved by the study. Therefore, although whale strandings have been linked to exposure to anthropogenic sound, exposure to seismic sound is considered *unlikely* to cause direct marine mammal mortality.

2. Under experimental conditions, sub-lethal, temporary elevations in hearing thresholds (TTS) have sometimes been observed in captive marine mammals exposed to pulsed sounds. Currently, the likelihood of these effects have not been evaluated under field operating conditions; for some species of marine mammals the levels and types of sounds which may produce TTS can be predicted, so such evaluations may be possible. The significance of such TTS effects, were they occur, are likely to be unimportant, unless:

   a. the threshold was elevated repeatedly or for an extended period of time, which could result in a Permanent Threshold Shift [PTS]; or

   b. other threats were present at the same time as the temporary elevations in hearing thresholds, and the threats were ones normally avoided by acoustic means, such as predators or entanglements in fishing gear.

3. There are no documented cases of a marine mammal experiencing damage to non-auditory body tissues upon exposure to seismic surveys under field operating conditions. Therefore, exposure to seismic sound under field operating conditions is considered *unlikely* to result in such types of tissue damage to marine mammals, but the presence of other sound sources operating simultaneously with seismic operations should be taken into account when proposals are evaluated.

### *Direct Behavioral Effects*

<u>Displacement and Migratory Diversion:</u>

4) There is documented displacement and migratory diversion in some marine mammal species exposed to seismic sound. The duration of these effects may or may not extend beyond the duration of exposure. The effects are expected to vary between contexts, species, gender and age class, and individuals, and be dependant on the properties of received sound. The ecological significance of such effects is expected to be low, but may be higher if they:

   - displace feeding marine mammals from areas where there are no alternates,
   - displace marine mammals from resting areas where there are no alternates,
   - displace marine mammals from breeding or nursery areas, or
   - divert migrating animals from routes for which their alternate routes either do not exist or would incur substantially greater costs to traverse.

5) The magnitude of effect in these cases will depend on the biology of the species and the extent and duration of the dispersion or deflection. Also, there is a risk that a seismic project occurring in another area could cause incursion of displaced competitors into the critical habitat or area of high biological productivity occupied by other species.

6) In summary, exposure to seismic sound can result in displacement and/or migratory diversion in some marine mammals, but this effect is species, individual, and contextually-related. The ecological significance of such effects is *unknown*, but there are conditions under which the worst-case scenarios could be high.

Changes in Dive and Respiratory Patterns

7) There are documented changes in dive and respiratory patterns in some marine mammal species (e.g., bowhead whales, harbour and grey seals) exposed to seismic sound. There are records of the duration of these effects extending beyond the duration of exposure. The effects are expected to vary between contexts, species and individuals, and be dependant on the properties of received sound. The ecological significance of such effects is expected to be low, except if such effects:

   - interfere with feeding, or
   - incur substantial energetic costs;

   The magnitude of effect in these cases will depend on the biology of the species and the extent and duration of the dispersion or deflection.

8) In summary, exposure to seismic sound can result in changes in dive and respiratory patterns in some marine mammals, but this effect is expected to vary with species, individual, and context. The ecological significance of such effects is *unknown*, but there are conditions under which the worst-case scenarios could be high.

Changes in Social Behavior

9) Social behavior can include a wide variety of activities such as mating, cooperative feeding, play, aggressive interactions, and communication (see below). Studies of behavioral changes in other subsections of this summary describe effects on some of the activities that could be considered "social". However, there have been no directed studies of the effects of seismic sounds on mating, cooperative feeding, play, or aggressive interactions.

10) In summary, it is *unknown* if exposure to seismic sound can result in changes in marine mammal social behavior, but if it were to occur there are conditions under which the worst-case consequences of such changes could be highly significant.

Changes in Vocalisation Patterns

11) There have been direct studies of the potential for anthropogenic sound to cause changes in the vocalisation patterns of marine mammals. For most cetacean species studied, there were measurable changes in vocalisation patterns, but these studies were not conducted during seismic operations. In the UK, Norway, and the Sable Gully, sperm whales did not stop calling when exposed to seismic sounds. A study off Heard Island, found that sperm whales did not call during distant (690-1070 km away) seismic transmissions in some parts of the study, but did call during seismic transmissions during another part of the study. Blue whales in the NE Pacific stopped calling for approximately one hour when within 10 kilometers of a small (1600 $in^3$) seismic array; they resumed calling as they swam away from the array.

12) There is evidence that exposure specifically to seismic sounds has sometimes caused changes in vocalisation patterns in marine mammals. However, it has not been possible to measure the functional consequences of

these changes (such as loss of contact between individuals or reduced ability to coordinate social behaviors), if any, nor the percent of time which they would occur.

13) In summary, it is *known* that exposure to seismic sound can result in changes in marine mammal vocal behavior, and when it occurs there are conditions under which the worst-case consequences could be highly significant.

***Functional Consequences of Physical and Behavioral Effects***

Reduced Communication Efficiency

14) Many species of marine mammals both produce and respond to sounds. Studies have shown these vocalisations to sometimes communicate information that is functionally important for feeding, breeding, parental care, predator avoidance, or maintenance of social groupings. Studies have also found vocalisations can occur when there are no observable functional consequences, although in such cases it is unclear if the vocalisations had no consequences, or if the effects were longer term or farther afield than the studies. Hence it is difficult for research to produce conclusive results about the frequency of occurrence and consequences of disruption of communication by anthropogenic activities, including seismic sounds.

15) There have been no published studies of the potential for seismic sound to reduce the efficiency of communication in marine mammals. Loud sounds will reduce the efficiency of communication but the severity and conditions under which this occurs with marine mammals are poorly known. When seismic sounds are produced there are inter-pulse intervals which present the opportunity for cetaceans to place vocal communication signals, but cetaceans have not been shown to use this mechanism in the field. Moreover, there is unpublished information that when multi-path echoes occur, such as in areas of complex bathymetry, the pulses of the seismic sound may smear over distance and time, such that the quieter inter-pulse intervals may be reduced or eliminated. This creates the potential for calls of cetaceans such as blue whales to be masked by seismic sounds although the distances over which the masking would be effective, if it were to occur, are unknown. It is unknown if whales could reduce the effects of masking through processes such as changes in their calling patterns, and the consequences of these changes (if they occur) are unknown. This facultative response has been documented in some other marine mammal species exposed to loud manmade sounds. Therefore, it is *unknown* if exposure to seismic sound can result in such reduced communication efficiency in marine mammals.

Reduced Echolocation Efficiency

16) There have been no direct studies of the potential for seismic sound to reduce the efficiency of echolocation in marine mammals. Therefore, it is *unknown* if exposure to seismic sound can result in reduced echolocation efficiency in marine mammals.

Hampered Passive Acoustic Detection of Prey

17) There have been no direct studies of the potential for seismic sound to hamper the passive acoustic detection of prey by marine mammals. In a published study on the effects of whale watching vessels on killer whale behavior, it was postulated that sounds from these vessels could reduce the ability of killer whales to detect their prey. It is not known if such an effect could result during exposure to seismic sounds, or even which species of marine mammals use passive acoustic detection of prey as an important feeding strategy. However the potential for an effect is greatest for mysticetes whose best hearing sensitivity is thought to be at lower frequencies than other marine mammals. Therefore, it is *unknown* whether exposure to seismic sound could hamper the passive acoustic detection of prey by marine mammals.

Hampered Passive Acoustic Detection of Predators

18) There have been no direct studies of the potential for seismic sound to hamper the passive acoustic detection of predators by marine mammals. The potential for an effect is greatest for mysticetes, whose best hearing sensitivity is thought to be at lower frequencies than other marine mammals. However it is not known if such an effect occurs during exposure to seismic sounds, and if so, to what extent. Therefore, it is *unknown* whether exposure to seismic sound could increase the vulnerability of marine mammals to predators.

Hampered Avoidance of Anthropogenic Threats (such as ship strikes, net entanglement)

19) There have been no direct studies of the potential for seismic sound to reduce the ability of marine mammals to avoid anthropogenic threats. There are published reports of other types of sounds interfering with the ability of individual whales to avoid anthropogenic threats such as ship strikes and net entanglements, but it is not known how widespread this response is. It is also not known if such an effect could result from exposure to seismic sounds. Therefore, it is a *concern* that exposure to seismic sound could reduce the ability of marine mammals to avoid anthropogenic threats, but the risk has not been demonstrated.

Hampered Parental Care or Bonding

20) There have been no direct studies of the potential for seismic sound to hamper parental care or bonding in marine mammals. Therefore, it is *unknown* if exposure to seismic sound can hamper parental care or bonding in marine mammals.

***Chronic Effects (e.g., stress-related physiological changes, reduced fecundity)***

21) There have been no studies of the potential for seismic sound to induce chronic effects, such as immunosuppression or reduced fecundity, in marine mammals. Therefore, it is *unknown* if exposure to seismic sound can result in such chronic effects on marine mammals.

***Indirect Effects (e.g., reduced prey availability)***

22) There have been no studies of the potentiai for seismic sound to reduce prey availability, through displacement or reduced catchability, for marine mammals. Therefore, it is *unknown* if exposure to seismic sound can result in such indirect effects on marine mammals.

## *Research Needs*

In the review a large number of areas of future research were identified. Some emerged as particularly helpful in increasing the information available to those quantifying and those managing the risks of seismic surveys in marine ecosystems.

1) More work is required to determine the sound characteristics and environmental conditions under which seismic effects on behavior, physiology, and physical well-being of all types of marine species might occur.

2) The available information on the effectiveness of mitigation measures needs to be more fully evaluated, as a basis for both interim advice on appropriate operational requirements in the short term and additional research needs to increase our knowledge in the longer term.

3) In addition to targeted research, there is great value to linking a program of structured collection of information to the conduct of seismic surveys, to facilitate learning-by-doing. However, such information collection programs must be well coordinated, and accompanied by the resources to analyse, interpret, and apply the new information, as it is collected and submitted to scientific authorities.

4) A few representative studies on distance-effect relationships for all taxa, but particularly eggs and larvae, would greatly aid understanding of potential risks posed by seismic sound. The potential for effects stemming from sound exposure level (cumulative over a survey) as well as peak received sound pressure level should be considered, including under conditions of 3-D surveys.

5) Specific research is needed on the level of received sound experienced by sessile invertebrates, and the effects of seismic sounds on such organisms. The physics of the sound levels to which benthic organisms are exposed is complicated due to shear effects interacting with pressure effects, and the proximity to the bottom substrates. Hence results of generic sound propagation models are likely to be misleading with regard to exposure levels of sessile benthic species. However, the errors could be in any direction, and in sites of complex bathymetry there could be very patchy distributions of areas with higher intensities of exposure than predicted by sound propagation models and other areas with lower intensities.

6) There is a specific absence of information on the effects of seismic sounds on molting of invertebrates with hard exoskeletons.

7) There is a need to further clarify the best sound propagation models for the areas likely to host seismic exploration, and how habitat characters should influence model selection. Generic models also need to be evaluated relative to the sensitivity and precision of their predictions relative to requirements for evaluating potential impacts, although site-specific implementations of generic models will continue to be desirable.

8) Better data input is needed during modelling of the expected pattern of spread of seismic sounds during surveys. Near-and far-field sound measurements should be encouraged as part of seismic operations planned for an area that has not been surveyed previously, or if previous models have been shown to be inaccurate.

9) Further research on potential impacts of seismic sound on marine mammals is urgently needed. The issues in most need of attention through scientific research or further analysis of existing data include:

    a) An important scientific unknown limiting our ability to predict the effects of seismic surveys on marine mammal populations is knowledge of their spatio-temporal distribution, and physiological state and needs. Without knowledge about what species are present in which areas at what time of the year and for what purpose, there will always be risks of disturbance and injury to sensitive species. An effort should also be made to characterise the degree of

long-term natural variation in abundance and residency.

b) There is a need for significantly more information regarding the reactions of marine mammals (and their prey) to underwater sound from seismic arrays. Baseline studies prior to seismic operations, plus comparative reports during periods with and without seismic would contribute important new data.

c) There is a need for better and more accurate information on naturally-occurring and man-made noise in the ocean.

d) The effectiveness of all potential mitigation measures needs to be explored and documented more fully. In particular there is a need to document the extent to which passive and/or active acoustic monitoring of marine mammals from the source vessel is an effective mitigation strategy.

e) There is a particular need for directed studies of social behavior of marine mammals during seismic exposures, given the importance of these activities to marine mammals' biology.

f) The effects of anthropogenic sounds on the vocalisation patterns of marine mammals are well documented, but the effects of specifically seismic sounds are poor known, and warrant further study.

Many of these factors are also poorly known for many taxa of marine turtles, fish, and invertebrates. Research to fill in such knowledge gaps, particularly with regard to spatio-temporal distribution of important prey taxa and their reactions to seismic sound, would be valuable, although the topics listed above were given higher priority. A number of other topics requiring additional research were proposed by various individuals, and are recorded in the meeting proceedings.

## *References*

DFO, 2003. A Framework to Assist DFO Consideration of Requests for Review of Seismic Testing Proposals. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Habitat Status Report 2003/001.

LGL. 2004. Assessment of Regulatory Practices Governing the Limits of Sound Energy Produced during Seismic Operations (draft). LGL Limited, environmental research associates, Report TA4014-1. (Unpublished)

## *For more Information*

Contact: Hugh Bain
Environmental Science
Fisheries and Oceans Canada
200 Kent Street
Ottawa, Ontario
K1A 0E6

Tel: (613) 990-0288
Fax: (613) 954-0807
E-Mail: bainh@dfo-mpo.gc.ca

This report is available from the:

Canadian Science Advisory Secretariat
200 Kent Street
Ottawa, Ontario
K1A 0E6

Telephone: (613) 990-0293
Fax: (613) 954-0807
E-Mail: CSAS@dfo-mpo.gc.ca
Internet address: www.dfo-mpo.gc.ca/csas

ISSN 1708-6272 (Print)
© Her Majesty the Queen in Right of Canada, 2004

*La version française est disponible à l'adresse ci-dessus.*

## *Correct citation for this publication*

DFO, 2004. Review of Scientific Information on Impacts of Seismic Sound on Fish, Invertebrates, Marine Turtles and Marine Mammals. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Habitat Status Report 2004/002.

Pêches et Océans Canada | Fisheries and Oceans Canada
Sciences | Science

**Région de la capitale nationale** **Rapport sur l'état des habitats 2004/002**

# Évaluation des renseignements scientifiques sur les impacts des bruits sismiques sur les poissons, les invertébrés, les tortues et les mammifères marins

**Renseignements de base**

*Un inventaire des facteurs écologiques que le MPO devrait considérer lors de l'examen préalable des projets de prospection sismique dans les eaux canadiennes a été établi lors d'un atelier de travail, tenu en mars 2003, dont l'objectif était d'élaborer un cadre décisionnel pour l'examen préalable de ces projets. Les sources d'incertitude quant aux effets des bruits sismiques sur ces facteurs écologiques et les manières de présenter cette incertitude dans des documents d'évaluation scientifique des impacts possibles ont aussi été discutées. On n'a toutefois pas tenté de faire une revue critique des ouvrages scientifiques sur les impacts des bruits sismiques ou l'efficacité de mesures d'atténuation. Conséquemment, ni les marges de tolérance des impacts écologiques, s'il en existe, ni les normes opérationnelles visant à assurer le respect de ces marges, n'ont été couvertes.*

*À la suite de l'atelier de travail, des équipes de scientifiques ont préparé une revue exhaustive des publications spécialisées primaires et secondaires portant sur des études expérimentales et la surveillance sur le terrain des effets des sons, en particulier les bruits sismiques, sur les organismes marins. Des analyses ont aussi été effectuées par des contractuels sur les normes et les mesures d'atténuation appliquées par d'autres organismes nationaux et internationaux chargés de la réglementation des relevés sismiques effectués dans les écosystèmes marins, ainsi que sur les forces et les faiblesses des divers modèles de propagation des sons dans le milieu marin. Ces documents ont été passés en revue lors d'une réunion du Processus consultatif national portant sur le cadre d'évaluation des impacts des relevés sismiques, tenue en mai 2004, bien que, en raison du manque de temps, un examen critique détaillé du document sur les normes et les mesures d'atténuation n'a pu être effectué.*

*Figure 1 : Carte du Canada*

## *Sommaire*

- D'après les données disponibles, on peut conclure que les bruits sismiques émis dans le milieu marin ne sont pas complètement sans répercussions, mais il n'est également pas certain qu'ils résultent en dommages graves et irréversibles pour l'environnement. Toutefois, parmi la large gamme des effets entre ces deux extrêmes, il existe de nombreuses répercussions nuisibles *potentielles*. Les risques que posent ces répercussions sont en général mal quantifiés, souvent inconnus, et susceptibles de varier selon les conditions du milieu et la condition des organismes exposés aux sons. Des relevés sismiques sont effectués en mer depuis longtemps à l'échelle planétaire sans qu'ils n'aient donné lieu à des mortalités documentées de poissons ou d'invertébrés, mais seulement à des éléments circonstanciels les associant à de rares échouements de mammifères marins et de calmars géants. Ceci suggère que des relevés sismiques assujettis aux mesures d'atténuation courantes en place sont peu probables de poser un risque élevé de mortalité chez

les organismes marins. Cet énoncé doit toutefois être nuancé, parce que des effets sublétaux ou à plus long terme pourraient s'être produits mais ne pas avoir été décelés lors des programmes typiques de surveillance mis en place.

- Les réponses comportementales immédiates des organismes marins à l'exposition à des bruits sismiques, en particulier celles des mammifères marins, sont bien documentées. On pense entre autres aux comportements d'évitement du secteur où les sons sont produits ou à la diminution des vocalisations. Les conséquences potentielles à long terme de ces changements de comportement à court terme sont l'objet d'un débat entre les spécialistes. Ce débat est en grande partie spéculatif car peu de données empiriques sont disponibles pour établir la probabilité que se produise la chaîne complète d'événements menant à des conséquences graves à long terme résultant des réponses comportementales à court terme. Les probabilités combinées que tous les événements de la chaîne se produisent constituent le véritable risque à gérer.
- Quel que soit le niveau absolu de risque que posent les bruits sismiques, il existe des mesures d'atténuation qui, selon les éléments probants disponibles, permettent de réduire les risques à divers degrés et parfois substantiellement. L'efficacité de mesures particulières d'atténuation n'a pas été évaluée en détail lors de la réunion, mais on a convenu de façon générale qu'elle dépendait de l'effet escompté et de la mise en oeuvre. L'impact de la mise en oeuvre de certaines mesures d'atténuation sur les activités de prospection sismique, tel ne pas mener des relevés à certaines périodes ou à des endroits critiques, est aussi fonction de nombreux facteurs, mais pourrait parfois être important. Il est évident que beaucoup plus de recherche et d'activités de surveillance sont nécessaires afin de clarifier et de mieux quantifier les risques et les effets incertains, s'ils se produisent, et pour évaluer l'efficacité de mesures d'atténuation permettant de contrer une liste plus complète d'effets potentiels. À cette fin, certains secteurs clés de recherche sont énumérés ci-dessous.

## *Introduction*

En mai 2004, un groupe de scientifiques du MPO, d'autres agences fédérales et internationales, de l'industrie sur l'exploration d'hydrocarbure ainsi que des groupes environnementaux, ont passé en revue la littérature primaire et secondaire des études expérimentales et de surveillance en mer sur les effets des sons, particulièrement les sons sismiques, sur les organismes marins. Cette réunion a permis d'établir que l'information disponible sur essentiellement tous les aspects des impacts des bruits sismiques sur les écosystèmes marins était incomplète à divers degrés. Malgré cela, les documents de travail et les délibérations ont permis le regroupement d'un ensemble de renseignements qui ont permis de formuler les conclusions suivantes.

Ces conclusions serviront de fondement scientifique à l'élaboration d'un cadre de réglementation de l'utilisation de sons dans les milieux aquatiques, au moins pour les fréquences utilisées pour la prospection sismique. Certaines des conclusions tirées d'études en laboratoire pourraient être applicables à des fréquences plus élevées, mais lors de l'évaluation, l'accent a été mis sur les études scientifiques s'appliquant directement aux bruits sismiques. Ces conclusions serviront aussi de fondement scientifique à une démarche intégrée de gestion des incidences anthropiques sur les écosystèmes marins et d'examen préalable des projets de prospection sismique au niveau régional et national au sein du MPO.

## *Préoccupation relative à l'habitat*

La préoccupation principale lors de la revue était l'effet des sons, particulièrement les

sons sismiques, sur les organismes marins. L'avis d'experts a été recueilli pour assurer un fondement scientifique à l'élaboration d'un cadre de réglementation de l'utilisation de sons dans les milieux aquatiques, au moins pour les fréquences utilisées pour la prospection sismique.

## *Considérations de gestion*

***Considérations générales :***

1) Les énoncés et conclusions qui suivent reposent sur les renseignements disponibles présentés lors de l'atelier de travail sur le cadre d'évaluation des impacts des relevés sismiques. Des recherches supplémentaires sont requises dans de nombreux domaines et un certain nombre d'entre elles sont identifiées dans le procès-verbal de la réunion. Ces énoncés et conclusions devraient être réévalués à mesure que de nouveaux renseignements sont disponibles.

2) Lorsque l'on considère les impacts possibles des bruits sismiques sur l'écosystème marin, il est logique d'inclure ces considérations dans le cadre plus vaste des incidences de tous les bruits anthropiques sur l'écosystème. Les principales sources de bruits anthropiques qu'il serait approprié de considérer dans un contexte général sont les bruits sismiques, le trafic maritime, les explosifs, la construction et le SONAR à basse fréquence. En outre, la portée des impacts du bruit dans l'environnement, s'il y a lieu, devrait être évaluée dans le contexte d'autres utilisations de l'écosystème.

3) En raison de la rareté de renseignements scientifiques, notamment de ceux tirés d'expériences en mer portant sur les poissons, les invertébrés et les gros mammifères marins, il est extrêmement difficile d'évaluer les impacts d'un type particulier de bruits sismiques, ou plus généralement du bruit, sur une espèce en particulier. Ne considérer que les impacts des bruits sismiques aurait réduit la base de l'information, déjà mince, à un point qui n'aurait pas permis d'étayer quelque conclusion que ce soit à un niveau de confiance acceptable. Nous avons donc élargi notre champ de recherche de renseignements pertinents.

4) Ce n'est pas seulement pour des raisons de commodité que nous avons élargi notre champ de recherche de renseignements au-delà des publications sur les effets des bruits sismiques sur les espèces marines. Étant donné la rareté de renseignements solides sur de si nombreuses facettes de ce problème multidimensionnel, il est probable que seule une vue d'ensemble de toutes les sources de renseignements disponibles nous permettra de faire une évaluation utile du risque.

5) De nombreuses conclusions ont trait à la probabilité que divers effets biologiques se produisent si les animaux sont exposés à des bruits sismiques. Ici, il s'agit d'une probabilité relative, qui n'est pas le produit d'évaluations quantitatives du risque puisque les renseignements disponibles ne permettent pas d'en faire. Établir qu'un événement a une « forte probabilité » de se produire ne signifie pas que nous nous attendons forcément à ce qu'il se produise chez neuf animaux exposés au bruit sur dix, ou même dans neuf de dix réplications d'une même expérience. Cela signifie plutôt que, en comparaison de la probabilité attendue pour l'événement en l'absence de bruits sismiques, celle-ci a augmenté considérablement, et que cet évènement serait observé si recherché avec une diligence appropriée. Il se peut par ailleurs que ce ne soit pas un événement typique. Lorsqu'il est possible de quantifier la probabilité d'un événement, nous utilisons le terme « probabilité » plutôt que « vraisemblance ».

6) Les conclusions qui suivent font souvent allusion aux « bruits sismiques » et « conditions de prospection en mer ». Ces

expressions sont utilisées au sens familier et ne sont pas prescriptives. Dans le présent document, l'expression « bruits sismiques » désigne généralement les ondes produites par les types de canons à air et les réseaux de canons à air normalement utilisés à l'heure actuelle dans les eaux canadiennes. L'expression « conditions de prospection en mer » fait référence aux relevés sismiques 2-D et 3-D faisant appel à des mesures comme l'élévation graduelle du niveau de bruit au départ, et à la cessation de l'émission des sons lorsque des cétacés se trouvent à proximité du lieu de prospection.

7) Il est probable que la vraisemblance et la gravité des effets biologiques qui peuvent résulter des relevés sismiques varient en fonction des conditions environnementales locales (couverture de glace, topographie du fond marin, état de la mer, etc.) et de la condition des organismes (état de reproduction, état nutritif, etc.). L'évaluation du risque et du potentiel d'atténuation de ces effets devrait tenir compte de ces facteurs, mais il n'est pas nécessaire que les cadres réglementaires soient assortis de règles complexes pour être efficaces.

**Limites imposées aux conclusions quantitatives :**

8) On a convenu que l'aspect biologiquement important des bruits sismiques est le « son capté » par le(s) organisme(s) qui peuvent être potentiellement touchés. Mais le « son capté » est multidimensionnel. Les bruits sismiques (ou le bruit en général) peuvent être caractérisés par leur spectre de fréquences (énergie ou pression acoustiques en fonction de la fréquence acoustique), la pression acoustique de crête (un concept du domaine temporel, référant à l'amplitude instantanée maximale du signal de pression), la pression acoustique efficace (moyenne quadratique temporelle des pressions acoustiques instantanées calculée sur un intervalle de temps donné), le niveau d'exposition au bruit (une mesure de la « dose » d'énergie acoustique captée sur un intervalle de temps) et par d'autres moyens.

9) Les mécanismes par le biais desquels l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en des impacts biologiques sont suffisamment divers qu'il se peut qu'un seul paramètre ne puisse suffire à décrire le risque d'impacts d'un type particulier de bruits sismiques. Certains mécanismes peuvent être convenablement caractérisés par un ou deux de ces paramètres, tandis que d'autres peuvent ne l'être par aucun d'eux. Par exemple, il se peut que la pression acoustique de crête soit le paramètre le plus pertinent pour ce qui est du risque de traumatisme, alors que la pression acoustique efficace peut être celui qui est le plus pertinent pour les effets non traumatiques, comme les élévations temporaires du seuil d'audition. La bande de fréquences, l'intensité et la durée d'exposition contribuent toutes aux effets auditifs parce que, bien que l'effet auditif doit se produire dans les limites de la bande de fréquences d'exposition, nous prévoyons qu'il sera plus grand dans les limites du domaine des fréquences audibles par une espèce et diminuera aux marges de son seuil auditif.

10) De nombreuses études sur les incidences des bruits sismiques sur les animaux marins ne rendent pas compte de tous les renseignements sur les sons utilisés ou captés. Cette pratique mène souvent à l'élimination de renseignements importants et rend très difficile la comparaison des résultats d'une étude à l'autre.

11) Bien que les expériences sérieuses devraient être en mesure de déterminer quelle(s) caractéristique(s) du stimulus sonore cause (causent) les réactions observées (lorsqu'elles se produisent), les ouvrages publiés sur des expériences portant sur des poissons et des invertébrés marins décrivent rarement en

détail suffisamment de caractéristiques des sons utilisés pour permettre d'interpréter avec confiance les observations biologiques.

12) Les ouvrages publiés sur des expériences portant sur l'exposition des mammifères marins à des stimuli sonores et sur leur observation sur le terrain suite à de tels stimuli sont plus nombreux que les ouvrages publiés sur les effets de ces stimuli sur d'autres organismes marins. Les premiers constituent alors probablement un fondement plus solide (mais encore partiel) pour établir des seuils. Toutefois, les résultats, lorsque considérés dans leur ensemble, sont complexes et incohérents et n'ont pas permis de s'entendre sur les seuils quantitatifs pour les impacts sur les mammifères marins, même lorsque les résultats étaient issus d'études donnant des descriptions adéquates des caractéristiques des sons. L'évaluation détaillée en voie d'être faite par le groupe d'experts sur les critères acoustiques du NMFS couvre mieux ces renseignements, et pourrait contenir une synthèse quantitative des relations entre les stimuli et les réponses reposant sur les renseignements disponibles à l'heure actuelle. Cette évaluation, lorsqu'elle sera diffusée, constituera peut-être une source utile de renseignements pour définir les seuils de tolérance réglementaires. Lorsque les niveaux de sensibilité des tortues, des poissons ou des invertébrés marins sont documentés comme étant supérieurs à ceux des mammifères marins, les normes, lignes directrices et/ou règlements canadiens devraient en tenir compte. Nous avons formulé l'hypothèse que les espèces sédentaires qui ne peuvent pas quitter un secteur exposé à des bruits sismiques peuvent connaître des niveaux plus élevés d'exposition que les animaux mobiles et les mesures de gestion devraient aussi tenir compte de ce fait.

13) Le « degré d'importance » écologique peut être une expression chargée de sens, quoique, dans les conclusions qui suivent, le terme « important » n'est utilisé que dans le contexte des secteurs de responsabilité du MPO. Plus précisément, le MPO est responsable de la conservation des espèces aquatiques (sauf les oiseaux) et des écosystèmes, et lorsque des incidences nuisibles à l'échelle d'une population sont considérées comme probables, le MPO doit voir à ce qu'elles soient atténuées ou corrigées. De même, dans le cas des espèces aquatiques protégées en vertu de l'Annexe 1 de la LEP, s'il est probable que des individus soient tués, qu'ils soient blessés ou qu'ils soient harcelés, le MPO doit soit prendre des mesures pour réduire les impacts ou accorder un permis en vertu des dispositions de l'article 73 de la LEP.

**Autres limites :**

14) Des effets sublétaux sur des organismes marins ont été signalés dans un certain nombre d'études, notamment des teneurs élevées de composantes chimiques causées par le stress et des dommages aux oreilles ou à d'autres structures morphologiques. Le peu d'études à long terme sur les organismes marins exposés à des bruits sismiques signifie que les conséquences à long terme de ces effets, lorsqu'ils se produisent, demeurent inconnues.

15) Le degré de gravité des impacts au niveau d'une population peut être plus élevé dans le cas d'un effet comme le masquage, s'il se produit, parce que le masquage peut toucher une très grande région géographique dans le cas des sons de basse fréquence. En outre, les signes immédiatement observables qu'un effet de masquage s'est produit peuvent être peu nombreux, de sorte qu'il est moins probable que des mesures d'atténuation soient déclenchées que cela ne serait le cas si des animaux étaient tués à la suite d'un traumatisme (une conséquence plus facilement observable et plus limitée sur le plan géographique).

## *Conclusions au sujet des poissons*

### Effets physiques

1) Il n'existe aucun cas documenté de mortalité de poissons imputable à l'exposition à des bruits sismiques dans des conditions de prospection en mer. En ce qui concerne la détectabilité de mortalités de poissons, si elles se produisent, on a noté qu'au Canada, les relevés sismiques comprennent souvent, mais non systématiquement, la participation de bateaux de queue chargés de déceler les mortalités de poissons et qu'aucune mortalité n'a été observée. On a noté aussi que ces dernières ne sont pas forcément des événements cachés et les mortalités de poissons causées par des conditions anoxiques, des déversements de substances toxiques, etc., sont souvent facilement décelables. Cependant, on a également soutenu que l'efficacité de détection des mortalités de poissons par les navires de queue n'a pas été vérifiée de façon indépendante, de sorte que l'on ne peut pas éliminer la possibilité que certaines n'aient pas été décelées.

2) Dans des conditions expérimentales, des chercheurs ont découvert que certains individus de trois des quatre espèces mises à l'épreuve sont morts à la suite d'une exposition de 24 h à des tonalités de fréquence basse (< 500 Hz) de > 170 dB. Des participants à l'atelier ont noté que les conditions expérimentales étaient fortement différentes des conditions de prospection sismique en mer et qu'il n'était pas justifié d'extrapoler les résultats de cette expérience aux relevés sismiques. D'autres ont toutefois soutenu que les résultats indiquent que le risque de mortalité directe de poissons imputable aux sons ayant quelques caractéristiques en commun avec les bruits sismiques ne peut pas être complètement ignoré.

3) Un rapport anecdotique de mortalité de poissons à la suite d'une exposition aux émissions d'un canon à air situé à moins de 2 m d'eux a été discuté, mais a été considéré comme étant non concluant par rapport aux conditions de prospection en mer. En général, on considère qu'il est *peu probable* que l'exposition à des bruits sismiques résulte en une mortalité directe de poissons.

4) Dans des conditions expérimentales, on a parfois observé des effets sublétaux et/ou physiologiques, y compris des effets sur l'ouïe, chez des poissons exposés aux émissions d'un canon à air. Le protocole expérimental était tel qu'il était impossible de déterminer à la satisfaction de tous les spécialistes quelle intensité acoustique était responsable des dommages observés aux structures de l'oreille, ni le degré d'importance de ceux-ci sur le plan biologique. Les expériences simulées en mer visant à établir ces effets n'étaient pas concluantes. Les renseignements dont nous disposons ne nous permettent pas d'évaluer la vraisemblance d'effets sublétaux ou physiologiques dans des conditions de prospection en mer. Le degré d'importance écologique des effets sublétaux ou physiologiques, lorsqu'ils se produisent, peut se situer entre négligeable à important selon leur nature.

### Effets sur le comportement

5) Les effets suivants chez certains poissons exposés à des bruits sismiques ont une forte vraisemblance de se manifester :
   - Une réaction de sursaut,
   - un changement dans le comportement de nage (y compris potentiellement des changements dans la vitesse et la direction de nage),
   - un changement dans la distribution verticale.

6) Ces effets devraient être de courte durée, inférieure ou égale à la durée de l'exposition, varier d'une espèce et d'un individu à l'autre et dépendre des

propriétés des sons captés. On s'attend à ce que le degré d'importance écologique de tels effets soit faible, sauf lorsqu'ils ont une incidence sur les activités de reproduction.

7) Plusieurs études scientifiques ont porté sur d'autres effets des bruits sismiques sur le comportement des poissons. Certaines ont permis d'établir les effets suivants et d'autres non :

   - un changement dans la répartition horizontale du poisson non étroitement associé à des éléments de l'habitat, tels des récifs et des pinacles;
   - un changement dans la capturabilité du poisson possiblement lié à des changements dans le comportement. Des différences dans les protocoles expérimentaux et l'absence de groupes témoins adéquats dans certaines des expériences signifient que les résultats publiés ne permettent pas de prédire la nature de tout changement qui peut se produire ou même si un changement se produira.

8) La durée de ces effets peut ou non se prolonger au-delà de la durée d'exposition. Ils peuvent varier d'une espèce et d'un individu à l'autre et dépendre des propriétés des sons captés. On s'attend à ce que le degré d'importance écologique des effets soit faible, sauf lorsqu'ils peuvent mener à la dispersion de bancs de reproducteurs ou à la déviation des voies de migration. L'ampleur de l'effet dans ces cas dépendra de la biologie de l'espèce touchée et de l'ampleur de la dispersion ou de la déviation.

**Utilisations fonctionnelles des sons**

9) Le potentiel des bruits sismiques de perturber la communication entre les poissons, la détection de prédateurs ou de proies, la navigation et d'autres utilisations des sons n'a pas été étudié. Certains supposent que la nature discontinue des bruits sismiques peut permettre à ces fonctions de se produire entre les « impulsions » de sons. Certains supposent aussi que les réponses comportementales peuvent inclure l'arrêt de la production de sons. Si des dommages auditifs se produisaient, on peut aussi s'attendre à ce qu'ils aient une incidence sur ces fonctions. Le degré d'importance écologique de ces effets est inconnu.

## *Conclusions au sujet des invertébrés*

**Effets physiques**

1) Aucun cas documenté de mortalité d'invertébrés imputable à l'exposition à des bruits sismiques dans des conditions de prospection en mer n'a été trouvé. Un rapport anecdotique de l'échouement de calmars géants à deux reprises, correspondant à des périodes de prospection sismique, a été discuté mais trouvé peu concluant.

2) Dans des conditions expérimentales, des effets létaux et/ou sublétaux, y compris des effets sur la structure externe, ont parfois été observés chez des invertébrés exposés aux émissions d'un canon à air situé à proximité (moins de 5 m).

3) Par conséquent, on considère qu'il est *peu probable* que l'exposition à des bruits sismiques entraîne directement la mort d'invertébrés.

**Effets physiologiques**

4) Il existe une série de publications établissant les effets de l'exposition prolongée à des bruits non sismiques sur la physiologie de crustacés dans des conditions expérimentales. Les effets incluent une baisse des taux de croissance et de reproduction et des modifications du comportement, ce qui indique que certains invertébrés sont sensibles au bruit. Chez un gastéropode (mollusque), les effets physiologiques

(signes de stress) ont été observés dans des conditions de prospection sismique en mer. Chez d'autres espèces, de tels effets étaient rarement présents, sauf pour quelques signes d'excitation chez des crabes soumis à des sons comparativement à des crabes témoins.

5) Le manque de renseignements ne permet pas d'évaluer la vraisemblance d'effets sublétaux ou physiologiques sur les crustacés durant les périodes de prémue, de mue et de postmue.

6) Le degré d'importance écologique des effets sublétaux ou physiologiques, s'ils se produisaient, pourrait varier entre négligeable à important selon leur nature.

**Effets comportementaux**

7) Il existe une forte probabilité de voir les effets suivants chez certains invertébrés exposés à des bruits sismiques :

   - Une réaction de sursaut,
   - un changement dans les comportements de nage/déplacement (y compris potentiellement un changement dans la vitesse de nage/déplacement et dans la direction).

8) Des taux de capture d'espèces pêchées commercialement à la hausse et à la baisse ont été documentés, mais les changements ne se produisent pas de façon cohérente.

9) On s'attend à ce que ces effets soient de courte durée, souvent moindre que la durée d'exposition, qu'ils varient d'une espèce et d'un individu à l'autre et qu'ils dépendent des propriétés des sons captés.

10) Certains invertébrés sont sédentaires ou ont peu de capacité de se déplacer. Leur capacité d'éviter les bruits sismiques est donc extrêmement limitée en comparaison de nombreux poissons et mammifères marins. Cela peut les exposer davantage aux bruits sismiques, mais rien ne permet de supposer qu'une exposition accrue rend ces invertébrés fondamentalement plus ou moins sensibles à ces bruits.

11) On s'attend à ce que le degré d'importance écologique des effets soit faible, sauf si les effets de l'exposition à des bruits sismiques avaient une incidence sur les activités de reproduction ou de croissance (mue) ou menaient à la dispersion de groupes de reproducteurs ou à la déviation des voies de migration. L'ampleur de l'effet dans ces cas dépendra de la biologie de l'espèce et de l'ampleur de la dispersion ou de la déviation.

**Utilisations fonctionnelles des sons**

12) Le potentiel pour les bruits sismiques de perturber la communication, l'orientation, la détection de prédateurs et de proies, la locomotion et d'autres utilisations fonctionnelles des sons par les invertébrés n'a pas été étudié. Les sons forts réduiront l'efficacité de la communication et d'autres utilisations fonctionnelles des sons, mais le degré de gravité de ces effets et les conditions dans lesquelles ils se produisent chez les invertébrés demeurent inconnus. On ne sait pas si les invertébrés peuvent communiquer par voie acoustique durant les intervalles entre les impulsions de bruits sismiques. Le degré d'importance écologique de tels effets, s'ils se produisent, est inconnu.

## *Conclusions au sujet du zooplancton, des oeufs et des larves de poissons et d'invertébrés*

1) Peu d'études sur les effets des bruits sismiques sur le zooplancton, les oeufs et les larves ont été recensées et certaines d'entre elles donnaient une description inadéquate du protocole expérimental et des propriétés des sons appliqués lors

des traitements, ou souffraient de lacunes dans les méthodes.

2) Les données sont généralement insuffisantes pour évaluer les dommages potentiels aux oeufs et aux larves de poissons, de mollusques et de crustacés (ou d'autres organismes planctoniques) que peuvent causer les bruits sismiques dans des conditions de prospection en mer.

3) D'après les expériences publiées jusqu'à maintenant, les résultats montrent que l'exposition aux bruits peut stopper le développement des oeufs et causer des anomalies de développement chez une petite proportion d'oeufs et/ou de larves qui y ont été exposés. Toutefois, ces résultats ont été obtenus suite à un nombre d'expositions beaucoup plus élevé que cela pourrait se produire dans des conditions de prospection en mer et à des intensités acoustiques qui ne se produisent qu'à quelques mètres de la source sonore.

4) Les effets des bruits sismiques sur le comportement et la perception sensorielle des oeufs et des larves de poissons et d'invertébrés sont inconnus.

5) En général, le niveau de mortalité des oeufs et des larves qui pourrait résulter de l'exposition à des bruits sismiques, établi d'après des modèles, serait nettement inférieur au niveau qui pourrait nuire aux populations. Toutefois, certaines caractéristiques du cycle vital, notamment la distribution agrégée et le moment où se produisent les événements clés du cycle vital par rapport à la durée et à la couverture des relevés sismiques, pourraient nécessiter une évaluation au cas par cas.

6) Aucune étude portant spécifiquement sur le rôle des bruits sismiques dans la variation du recrutement chez les poissons et les invertébrés marins n'a été recensée. Beaucoup d'études ont été publiées sur les causes de la variation du recrutement chez ceux-ci, mais aucune n'a considéré qu'il existe des anomalies de recrutement (positives ou négatives) qui pourraient être liées dans l'espace ou le temps à des activités de prospection sismique. Cette absence d'évidence s'applique à l'échelle des stocks, mais ne donne pas d'information sur la possibilité d'effets sur la dynamique du recrutement à l'échelle locale.

## *Conclusions au sujet des tortues marines*

1) Les résultats d'études auditives donnent à penser que les tortues marines, en particulier la carette et la tortue verte, sont capables d'entendre les sons graves et d'y répondre, mais leur seuil auditif semble élevé.

2) Lors de trois études, les réactions comportementales suivantes de tortues marines gardées en enclos et exposées aux sons d'un canon à air ont parfois été observées :

   - une vitesse de nage plus élevée,
   - une activité accrue,
   - un changement dans la direction de nage,
   - l'évitement.

3) Les tortues marines peuvent s'habituer aux bruits sismiques au fil du temps, mais les résultats de trois études étaient non concluants à ce sujet.

4) La perte de sensibilité auditive et le stress physiologique ont aussi été considérés comme une conséquence possible de l'exposition aux bruits sismiques, mais la seule étude considérée était non concluante.

5) La réaction, s'il en existe une, des tortues marines en liberté aux bruits sismiques dans des conditions de prospection en mer est inconnue.

6) D'après les études réalisées jusqu'à maintenant, on considère qu'il est *peu probable* que les tortues marines soient plus sensibles aux bruits sismiques que les cétacés ou certains poissons marins. Par conséquent, toute mesure d'atténuation visant à réduire le risque ou la gravité d'exposition des cétacés aux bruits sismiques pourrait nous renseigner au sujet des mesures visant à réduire le risque ou le degré de gravité d'exposition des tortues marines aux bruits sismiques. Les tortues marines sont toutefois plus difficiles à détecter, visuellement et acoustiquement, que de nombreuses espèces de cétacés, de sorte que nous nous attendons à ce que les mesures d'atténuation reposant sur des observations ou la détection acoustique de tortues soient moins efficaces pour celles-ci que pour les cétacés.

## *Conclusions au sujet des mammifères marins*

### Mortalité et effets physiques

1. Il n'existe aucun cas documenté de mortalité de mammifères marins à la suite de l'exposition à des activités de prospection gazière et pétrolière par relevé sismique. Un cas d'échouement de deux baleines coïncidant dans l'espace et le temps à des activités de prospection sismique menées par un navire de recherche a été signalé. Un autre échouement de baleines impliquant le même navire et les mêmes baleines, coïncidant dans le temps mais non dans l'espace, a aussi été signalé, mais aucun mécanisme évident qui pourrait relier la distance entre le navire et le lieu d'échouement n'est établi. Dans les deux cas, le navire de recherche utilisait aussi un canon à air produisant des sons de fréquences moyennes nettement plus semblables aux signaux de fréquences moyennes émis par les sonars tactiques et impliqués dans les échouements de baleines en masse, qu'aux bruits sismiques. Le rôle des différentes sources sonores dans les échouements n'a pas été établi dans cette étude. Par conséquent, même si les échouements de baleines ont été liés à l'exposition à des sons anthropiques, on considère qu'il est *peu probable* que l'exposition à des bruits sismiques cause la mortalité directe de mammifères marins.

2. Dans des conditions expérimentales, on a parfois observé une élévation temporaire sublétale du seuil auditif chez des mammifères marins en captivité exposés à des sons par impulsions. La vraisemblance de ces effets n'a pas encore été évaluée dans des conditions de prospection en mer; pour certaines espèces de mammifères marins, les niveaux et les types de sons qui peuvent produire une élévation du seuil auditif peuvent être prédits, de sorte que de telles évaluations peuvent être possibles. Le degré d'importance de ces effets sur le seuil auditif, s'ils se produisaient, serait probablement sans importance à moins que :

   a. le seuil soit haussé à maintes reprises ou pendant une période prolongée, ce qui pourrait résulter en un déplacement permanent du seuil auditif;

   b. d'autres menaces sont présentes au même moment que l'élévation temporaire du seuil auditif et que celles-ci sont normalement évitées par des moyens acoustiques, notamment des prédateurs ou la possibilité d'enchevêtrement dans des engins de pêche.

3. Il n'existe aucun cas documenté de mammifères marins ayant subi des dommages à des tissus non-auditifs à la suite de l'exposition à des bruits sismiques dans des conditions de prospection en mer. Par conséquent, on considère qu'il est *peu probable* que l'exposition à des bruits sismiques dans des conditions de prospection en mer résulte en des dommages à de tels tissus

chez les mammifères marins, mais l'évaluation des propositions devrait tenir compte de la présence d'autres sources sonores opérant simultanément lors des activités de prospection sismique.

**Effets comportementaux directs**

Déplacement et déviation des voies migratoires :

4) Il existe des cas documentés de déplacement et de déviation des voies migratoires chez certaines espèces de mammifères marins exposés à des bruits sismiques. La durée de ces effets peut ou non s'étendre au-delà de la durée d'exposition. On s'attend à ce que les effets varient selon le contexte, l'espèce, le sexe, la classe d'âge et l'individu, et à ce qu'ils dépendent des propriétés des sons captés. On s'attend à ce que le degré d'importance écologique de ces effets soit faible, mais il pourrait être plus élevé dans les cas suivants :

   - ils déplacent des mammifères marins d'aires d'alimentation pour lesquelles il n'y a pas d'alternatives;
   - ils déplacent des mammifères marins d'aires de repos pour lesquelles il n'y a pas d'alternatives;
   - ils déplacent des mammifères marins d'aires de reproduction ou de croissance,
   - ils dévient des animaux en migration de leurs voies migratoires pour lesquelles il n'y a pas d'alternatives ou, s'il y en a, ils devront dépenser beaucoup plus d'énergie pour migrer.

5) L'ampleur des effets dans ces cas dépendra de la biologie de l'espèce touchée et de l'ampleur et de la durée du déplacement ou de la déviation. Il y a aussi un risque qu'un projet de prospection sismique mené dans un autre secteur puisse causer l'intrusion de compétiteurs déplacés dans l'habitat essentiel ou l'aire de productivité biologique élevée occupé par d'autres espèces.

6) En résumé, l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en un déplacement et/ou une déviation des voies migratoires chez certains mammifères marins, mais ces effets dépendent de l'espèce, de l'individu et du contexte. Le degré d'importance écologique de ces effets est *inconnu*, mais il existe des conditions dans lesquelles le pire des scénarios pourrait avoir de fortes incidences.

Changements dans les régimes de plongée et de respiration

7) Des changements dans les régimes de plongée et de respiration chez certaines espèces de mammifères marins (p. ex., baleine boréale, phoque commun, phoque gris) exposés à des bruits sismiques ont été documentés. Il y a des données indiquant que la durée de ces effets peut aller au-delà de la durée d'exposition. On s'attend à ce que les effets varient selon le contexte, l'espèce et les individus, et qu'ils dépendent des propriétés des sons captés. On s'attend à ce que le degré d'importance écologique de ces effets soit faible, sauf dans les cas suivants :

   - ils perturbent l'alimentation;
   - ils entraînent de grands coûts énergétiques.

   L'ampleur des effets dans ces cas dépendra de la biologie de l'espèce et de l'ampleur et de la durée de la dispersion ou de la déviation.

8) En résumé, l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en des changements dans les régimes de plongée et de respiration chez certains mammifères marins, mais on s'attend à ce que ces effets varient selon l'espèce, l'individu et le contexte. Le degré d'importance écologique de ces effets est *inconnu*, mais il existe des conditions

dans lesquelles le pire des scénarios pourrait avoir de fortes incidences.

Changements dans le comportement social

9) Le comportement social peut inclure une vaste gamme d'activités, notamment l'accouplement, l'alimentation coopérative, les jeux, les interactions agressives et la communication (voir ci-dessous). Les études sur les changements de comportement mentionnées dans d'autres sous-sections de ce résumé décrivent les effets sur certaines activités qui pourraient être considérées comme des activités « sociales ». Cependant, aucune étude ciblée des effets des bruits sismiques sur l'accouplement, l'alimentation coopérative, les jeux ou les interactions agressives n'a été menée.

10) En résumé, on ne *sait pas* si l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en des changements dans le comportement social des mammifères marins, mais s'ils se produisaient, il existe des conditions dans lesquelles le pire des scénarios pourrait avoir des conséquences très importantes.

Changements dans les modèles de vocalisation

11) Les changements dans les modèles de vocalisation des mammifères marins que peuvent causer les sons anthropiques ont été l'objet d'études ciblées. Chez la plupart des espèces étudiées, des changements mesurables dans les patrons de vocalisation ont été observés, mais ces études n'ont pas été menées dans des conditions de prospection sismique. Au Royaume-Uni, en Norvège et dans le goulet de l'île de Sable, les cachalots macrocéphales n'ont pas cessé d'émettre des sons lorsque exposés à des bruits sismiques. Lors d'une étude menée au large de l'île Heard, ces cétacés n'ont pas émis de sons lorsque des bruits sismiques ont été transmis très loin d'eux (à une distance de 690-1 070 km) dans certaines parties de l'étude, mais l'on fait à un autre moment de l'étude lorsque exposés à ces bruits. Dans le Pacifique Nord-Est, des rorquals bleus ont cessé de communiquer entre eux pendant environ une heure lorsqu'ils étaient en deçà de 10 km d'un petit réseau de canons à air (1 600 $po^3$), puis ont recommencé à communiquer lorsqu'ils s'en ont éloigné.

12) Des données démontrent que l'exposition particulière à des bruits sismiques a parfois causé des changements dans les patrons de vocalisation chez des mammifères marins. Il n'a toutefois pas été possible de mesurer les conséquences fonctionnelles de ces changements (comme la perte de contact entre les individus ou la réduction de la capacité de coordonner les comportements sociaux), s'il en existe, ni le pourcentage de fois qu'ils pourraient se produire.

13) En résumé, on *sait* que l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en des changements dans le comportement de vocalisation chez les mammifères marins et, lorsque cela se produit, il existe des conditions dans lesquelles le pire des scénarios pourrait avoir des conséquences très importantes.

**Conséquences fonctionnelles des effets physiques et comportementaux**

Efficacité réduite de communication

14) De nombreuses espèces de mammifères marins produisent des sons et y répondent. Des études ont démontré que ces vocalisations servent parfois à communiquer de l'information importante pour l'alimentation, l'accouplement, le soin des petits, l'évitement des prédateurs et le maintien des groupes sociaux. Des études ont aussi révélé que les vocalisations peuvent se produire même si aucune conséquence fonctionnelle n'est observable, quoique dans ces cas, il n'est pas clair si elles n'avaient pas de conséquences ou si les effets étaient de plus longue durée ou se produisaient plus loin que la zone d'étude. Il est donc difficile pour les recherches de donner des

résultats concluants sur la fréquence et les conséquences de la perturbation de la communication imputable à des activités anthropiques, y compris les bruits sismiques.

15) Aucune étude n'a été publiée sur le potentiel qu'ont les bruits sismiques de réduire l'efficacité de la communication chez les mammifères marins. Les sons forts la réduiront, mais le degré de gravité et les conditions dans lesquelles cela se produit chez les mammifères marins sont mal connus. Lorsque des bruits sismiques sont émis, les intervalles entre les impulsions offrent aux cétacés l'opportunité de communiquer, mais ce comportement n'a pas été observé sur le terrain. Des données inédites révèlent en outre que, lorsque des réflexions par trajets multiples se produisent, comme aux endroits où la topographie du fond marin est complexe, les impulsions de bruits sismiques peuvent s'étaler avec la distance et le temps, de sorte que les intervalles calmes entre les impulsions peuvent être réduits ou éliminés. Les bruits sismiques pourraient donc masquer les appels des cétacés, notamment le rorqual bleu, quoique les distances où le masquage serait effectif, s'il se produisait, sont inconnues. On ne sait pas si les baleines peuvent réduire les effets de masquage par divers moyens, comme des changements dans leurs patrons de vocalisation, et les conséquences de ces changements (s'ils se produisent) sont inconnues. Cette réponse facultative a été documentée chez certaines autres espèces de mammifères marins exposées à des sons forts d'origine anthropique. Par conséquent, on ne *sait pas* si l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en une réduction de la capacité de communication chez les mammifères marins.

Réduction de la capacité d'écholocation

16) Aucune étude ciblée du potentiel qu'ont les bruits sismiques de réduire l'efficacité d'écholocation chez les mammifères marins n'a été effectuée. Par conséquent, on ne *sait pas* si l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en une réduction de l'efficacité d'écholocation chez les mammifères marins.

Capacité diminuée de détection acoustique passive de proies

17) Aucune étude ciblée du potentiel qu'ont les bruits sismiques de diminuer la capacité de détection passive de proies chez les mammifères marins n'a été effectuée. Dans une étude publiée sur les effets des bateaux d'observation des baleines sur le comportement des épaulards, on a formulé l'hypothèse que les sons produits par ces bateaux pourraient réduire la capacité de ces cétacés de détecter des proies. On ne sait pas si un tel effet pourrait se produire durant l'exposition à des bruits sismiques ou chez quelles espèces de mammifères marins la détection passive de proies est une importante stratégie d'alimentation. Le potentiel d'un tel effet est toutefois plus grand chez les mysticètes, qui entendent mieux les sons de fréquences basses que d'autres mammifères marins. Par conséquent, on ne *sait pas* si l'exposition à des bruits sismiques pourrait diminuer la capacité de détection acoustique passive de proies chez les mammifères marins.

## *Capacité diminuée de détection acoustique passive de prédateurs*

18) Aucune étude ciblée du potentiel qu'ont les bruits sismiques de diminuer la capacité de détection passive de prédateurs chez les mammifères marins n'a été effectuée. Le potentiel d'un tel effet est plus grand chez les mysticètes, qui entendent mieux les sons de fréquences basses que d'autres mammifères marins. Cependant, on ne sait pas si un tel effet se produit durant l'exposition à des bruits sismiques et, si cela est le cas, dans quelle mesure. Par conséquent, on ne *sait pas* si l'exposition

à des bruits sismiques pourrait accroître la vulnérabilité des mammifères marins à leurs prédateurs.

## *Capacité diminuée d'évitement des menaces anthropiques (comme la collision avec des navires, l'enchevêtrement dans des filets)*

19) Aucune étude ciblée du potentiel qu'ont les bruits sismiques de réduire la capacité des mammifères marins d'éviter des menaces anthropiques n'a été effectuée. Des rapports ont été publiés sur d'autres types de sons nuisant à la capacité de baleines individuelles d'éviter des menaces anthropiques, comme la collision avec des navires et l'enchevêtrement dans des filets, mais on ne sait pas dans quelle mesure cette réaction est répandue. On ne sait pas non plus si un tel effet pourrait résulter de l'exposition à des bruits sismiques. Par conséquent, le fait que l'exposition à des bruits sismiques pourrait réduire la capacité des mammifères marins d'éviter des menaces anthropiques est *préoccupant*, mais le risque n'a pas été prouvé.

Capacité diminuée pour le soin des petits ou la formation de liens parentaux

20) Aucune étude ciblée du potentiel qu'ont les bruits sismiques de réduire la capacité des mammifères marins de prendre soin de leurs petits ou de former des liens parentaux n'a été effectuée. Par conséquent, on ne *sait pas* si l'exposition à des bruits sismiques peut réduire la capacité de soin des petits ou de formation de liens parentaux chez les mammifères marins.

**Effets chroniques (p. ex., changements physiologiques causés par le stress, fécondité réduite)**

21) Aucune étude du potentiel qu'ont les bruits sismiques de causer des effets chroniques, comme l'immunosuppression ou la diminution de la fécondité, n'a été effectuée chez les mammifères marins. Par conséquent, on ne *sait pas* si l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en de tels effets chroniques chez les mammifères marins.

**Effets indirects (p. ex., disponibilité réduite des proies)**

22) Aucune étude du potentiel qu'ont les bruits sismiques de réduire la disponibilité des proies des mammifères marins, soit par déplacement de celles-ci ou réduction de leur capturabilité, n'a été effectuée. Par conséquent, on ne *sait pas* si l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en de tels effets indirects sur les mammifères marins.

## *Besoins en recherche*

Lors de l'examen de la documentation disponible, un grand nombre de domaines de recherche pour le futur ont été identifiés. Certains se sont révélés comme étant particulièrement utiles pour ce qui est d'accroître la quantité de renseignements requis par ceux qui quantifient et ceux qui gèrent les risques que posent les relevés sismiques effectués dans les écosystèmes marins.

1) D'autres travaux doivent être effectués en vue d'établir les caractéristiques des sons et les conditions environnementales qui donnent lieu à des effets des bruits sismiques sur le comportement, la physiologie et le bien-être physique de toutes les espèces marines.

2) Les renseignements disponibles sur l'efficacité des mesures d'atténuation doivent être évalués plus à fond à titre de

fondement pour fournir des avis provisoires en matière d'exigences opérationnelles appropriées à court terme et d'autres recherches en vue d'élargir nos connaissances à long terme.

3) En plus de recherches ciblées, un programme de collecte structuré de données mené en parallèle avec les relevés sismiques, visant à faciliter l'apprentissage par la pratique, a beaucoup de mérite. Toutefois, de tels programmes de cueillette de données doivent être bien coordonnés et assortis des ressources nécessaires pour analyser, interpréter et appliquer les nouvelles données à mesure qu'elles sont recueillies et présentées aux autorités scientifiques.

4) Quelques études représentatives sur les relations entre la distance et les effets pour tous les taxons, en particulier les oeufs et les larves, aideraient grandement à comprendre les risques potentiels que posent les bruits sismiques. Les effets potentiels découlant du niveau d'exposition au bruit (cumulatif d'un relevé) ainsi que du niveau de pression acoustique de crête devraient être considérés, y compris dans des conditions de relevés 3-D.

5) Des recherches spécifiques sont requises sur le niveau de sons captés par les invertébrés sessiles et les effets des bruits sismiques sur eux. La physique des niveaux sonores auxquels les organismes benthiques sont exposés est compliquée en raison de l'interaction entre les effets de cisaillement et les effets de pression, ainsi que de la proximité du fond. Par conséquent, il est probable que les résultats de modèles génériques de la propagation des sons soient trompeurs pour ce qui est des niveaux d'exposition des espèces benthiques sessiles. L'erreur pourrait se manifester dans n'importe quel sens et, aux endroits où la topographie du fond est complexe, il pourrait y avoir une répartition irrégulière de secteurs ayant des niveaux d'exposition plus élevés que ceux prédits par les modèles de propagation des sons et d'autres secteurs avec des niveaux plus faibles.

6) Aucun renseignement n'est disponible sur les effets des bruits sismiques sur la mue des invertébrés possédant un exosquelette.

7) Les meilleurs modèles de propagation des sons dans les secteurs où se fera probablement de la prospection sismique doivent être davantage clarifiés, ainsi que la mesure dans laquelle les caractéristiques de l'habitat devraient influer sur le choix des modèles. La sensibilité et la précision des prédictions des modèles génériques par rapport aux exigences d'évaluation des impacts potentiels devraient être aussi évaluées, quoique l'application de modèles génériques à des endroits spécifiques demeurera souhaitable.

8) De meilleures données sont requises pour la modélisation du patron attendu de dispersion des bruits sismiques lors des relevés. On devrait préconiser la prise de mesures du niveau d'intensité acoustique en champ proche et en champ éloigné à titre d'élément des activités de prospection sismique planifiées dans les secteurs qui n'ont pas encore été prospectés ou pour lesquels les modèles établis se sont révélés inexacts.

9) D'autres recherches sur les impacts potentiels des bruits sismiques sur les mammifères marins sont requises d'urgence. Les questions les plus pressantes à examiner qui doivent faire l'objet de recherches ou d'analyses plus détaillées des données disponibles comprennent:

   a) La répartition spatio-temporelle ainsi que l'état et les besoins physiologiques des populations de mammifères marins sont des variables mal connues des scientifiques qui limitent notre capacité de prédire les effets que les relevés sismiques auront sur elles. Si nous ne savons

pas quelles espèces sont présentes où, quand et pourquoi, il existera toujours un risque de perturber et de blesser les espèces très sensibles. On devrait aussi tenter de caractériser le degré de variation naturelle à long terme de l'abondance et de la résidence.

b) Beaucoup d'autres renseignements sur les réactions des mammifères marins (et de leurs proies) aux sons provenant des réseaux de canons à air sont requis. Des études de base menées avant les activités de prospection sismique, en plus de comparaisons de leur comportement en l'absence et en présence de bruits sismiques, permettraient de recueillir ce type de données.

c) Des renseignements plus précis sur les bruits d'origines naturelles et anthropiques dans l'océan sont nécessaires.

d) L'efficacité de toutes les mesures d'atténuation potentielles doit être examinée et documentée de façon plus détaillée. Entre autre, la mesure dans laquelle la surveillance acoustique passive et/ou active des mammifères marins à partir du navire émetteur constitue une mesure d'atténuation efficace a besoin d'être documentée.

e) Des études ciblées du comportement social des mammifères marins durant l'exposition aux bruits sismiques sont spécialement nécessaires, étant donné l'importance des activités de prospection sismique sur leur biologie.

f) Les effets de sons d'origine anthropique sur les patrons de vocalisation des mammifères marins sont bien documentés, mais les effets des bruits sismiques sont mal connus et des études complémentaires sont donc indispensables.

Nombre de ces questions sont également mal comprises pour ce qui est de nombreux taxons de tortues, de poissons et d'invertébrés marins. Bien que les participants à l'atelier aient donné la priorité aux sujets énumérés ci-dessus, des recherches qui permettraient de combler ces lacunes, en particulier en ce qui concerne la répartition spatio-temporelle des proies importantes et leurs réactions aux bruits sismiques, seraient de grande valeur. Un certain nombre d'autres sujets nécessitant des recherches complémentaires ont aussi été proposés et sont mentionnés dans le procès-verbal de la réunion.

## *Références*

MPO, 2003. Un cadre pour aider le MPO à évaluer les demandes portant sur l'examen de propositions de prospection sismique. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Rapp. sur l'état des habitats 2003/001.

LGL. 2004. Assessment of Regulatory Practices Governing the Limits of Sound Energy Produced during Seismic Operations (draft). LGL Limited, environmental research associates, Report TA4014-1. (non-publié)

## *Pour obtenir de plus amples renseignements*

Contactez : Hugh Bain
Sciences de l'environnement
Pêches et Océans Canada
200, rue Kent
Ottawa (Ontario)
K1A 0E6

Tél. : (613) 990-0288
Télécopieur : (613) 954-0807
Courriel : bainh@dfo-mpo.gc.ca

Ce rapport est disponible auprès du :

Secrétariat canadien de consultation scientifique
200, rue Kent
Ottawa (Ontario)
K1A 0E6

Téléphone : (613) 990-0293
Télécopieur : (613) 954-0807
Courriel : CSAS@dfo-mpo.gc.ca
Adresse Internet : www.dfo-mpo.gc.ca/csas

ISSN 1708-637X (imprimé)
© Sa majesté la Reine, Chef du Canada, 2004

*An English version is available upon request at the above address.*

## *La présente publication doit être citée comme suit*

MPO, 2004. Évaluation des renseignements scientifiques sur les impacts des bruits sismiques sur les poissons, les invertébrés, les tortues et les mammifères marins Secr. can. de consult. sci. du MPO, Rapp. sur l'état des habitats 2004/002.